

Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr 合金 β 相区热变形行为及位错密度内变量本构模型

陈 刚¹ 王 静¹ 陈英杰¹ 陈 伟² 陈铁柱² 丁 杰² 张鸿名³
[1.哈尔滨工业大学(威海)材料科学与工程学院; 2.山东南山铝业股份有限公司;
3.哈尔滨工业大学(威海)海洋工程学院]

摘 要 通过热压缩模拟试验机 Gleeble3500 进行了 Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr(Ti-55531)合金在 β 相区的热模拟压缩试验(变形温度为 860、885、910、935 $^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 0.001、0.01、0.1、1 s^{-1}),采用光学显微镜分析了材料的组织演化行为。结果发现,Ti-55531 合金变形过程中的动态软化效应以动态回复为主,在低应变速率下,组织呈现再结晶特征。为了通过材料变形机制去描述流动应力行为,考虑加工硬化和动态软化机制对位错密度的影响,建立了 Ti-55531 合金在 β 相区的位错密度内变量本构模型。结果表明,该模型能够准确预测 Ti-55531 合金在 β 相区的热变形行为。

关键词 Ti-55531 合金;热变形; β 相区;组织演化;本构模型

中图分类号 TG146.23 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.05.001 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hot Deformation Behavior and Dislocation Density Based on Constitutive Model of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr Alloy in the β Phase Region

Chen Gang¹, Wang Jing¹, Chen Yingjie¹, Chen Wei², Chen Tiezhu², Ding Jie², Zhang Hongming³
[1.School of Materials Science and Engineering(Weihai), Harbin Institute of Technology; 2.Shandong Nanshan Aluminum Co., Ltd.; 3.School of Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology(Weihai)]

Abstract: The hot compression simulation experiment of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr (Ti-55531) alloy in β phase region with deformation temperature at 860, 885, 910, 935 $^{\circ}\text{C}$ and strain rate at 0.001, 0.01, 0.1, 1 s^{-1} was carried out by the Gleeble3500 thermal compression simulation machine. The microstructure evolution of the Ti-55531 was analyzed by OM. The results reveal that the dynamic softening effect of Ti-55531 alloy during the hot deformation is dominated by the dynamic recovery, and the microstructure is characterized by dynamic recrystallization at low strain rate. In order to describe the flow stress behavior by the material deformation mechanism, a unified constitutive model of Ti-55531 alloy based on dislocation density in β phase region was established considering the influence of hardening and dynamic softening mechanism on the dislocation density. The results indicate that the prediction model can accurately predict the hot deformation behavior of Ti-55531 alloy in β phase region.

Key Words: Ti-55531 Alloy, Hot Deformation, β Phase Region, Microstructure Evolution, Constitutive Model

Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr(Ti-55531)合金是一种高强度高韧近 β 钛合金,具有加工窗口宽、淬透性高及焊接性好等特点,在飞机起落架、机身框架及机翼连接件等大尺寸承力结构件的制造中具有广阔的应用前景^[1,2]。Ti-55531 合金在 β 相区温度进行热变形能够有效破碎材料粗大的晶粒组织,并利用动态再结晶细化其变形晶粒组织,对后续成形性能具有重要的影响^[3,4]。近 β 钛合金组织对热机械加工的工艺条件十分敏感^[5],温度、应变速率对材料的变形特性有显著影响,为了获得优异的组织性能,需严格控制其热加工工艺参数和成形过程。材料的本构模型是构建流动应力行为与变形工艺条件两者关系的重要途径,也是模拟合金工件成形过程、优化热机械加工工艺条件的基础。目前主要的本构模型有神经网络模型、唯象模型及物理模型^[6],其中物

收稿日期:2020-11-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875121,51905122);山东省自然科学基金资助项目(ZR2019MEE039)
第一作者简介:陈刚,男,1986 年出生,副教授,山东威海(264209),E-mail:gangchen@hit.edu.cn
通信作者:张鸿名,男,1984 年出生,讲师,山东威海(264209),E-mail:zhanghongming@hit.edu.cn
引用格式:陈刚,王静,陈英杰,等. Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr 合金 β 相区热变形行为及位错密度内变量本构模型[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(5):529-533.
CHEN G, WANG J, CHEN Y J, et al. Hot deformation behavior and dislocation density based on constitutive model of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr alloy in the β phase region[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5):529-533.

理本构模型能够关联起组织演化过程与流动应力行为，精确预测热机械加工的工艺条件对组织形态的影响，因此得到研究者的日益重视与应用。本课题对 Ti-55531 合金在 β 相区进行热模拟压缩试验，分析了材料热变形行为，基于流动应力行为与组织演化机制建立了以位错密度为内变量的物理本构模型，旨在为其应用提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为 Ti-55531 合金棒料，其化学成分见表 1，材料相变点温度为 $(840 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。沿 Ti-55531 合金棒材轴线方向线切割得到 $\phi 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的试样，在 Gleeble3500 热模拟试验机上进行等温压缩试验，变形温度分别为 860、885、910 和 935 $^\circ\text{C}$ ，应变速率分别为 0.001、0.01、0.1、1 s^{-1} ，试样压缩变形量为 50%。

表 1 Ti-55531 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Ti-55531 alloy										%
wt%										
Al	Mo	V	Cr	Zr	Fe	C	N	O	Ti	
5.29	4.95	4.90	3.05	1.05	0.33	0.018	0.006	0.08	余量	

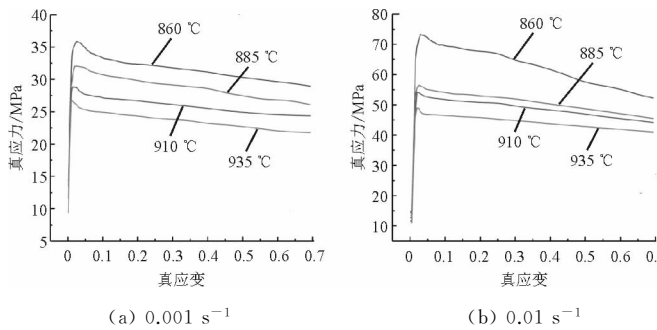


图 1 不同热变形条件下 Ti-55531 真应力-应变曲线

Fig.1 True stress-strain curves of Ti-55531 alloy at different deformation temperatures and strain rates

图 2 为合金在 935 $^\circ\text{C}$ 下的真应力-真应变曲线。可以看出，在同一温度下，合金的稳态应力随着应变速率的增大而增大，这是由于应变速率增大，塑性变形时间缩短，发生运动的位错数量增加，导致临界切应力增大，加工硬化过程加剧。同时，应变速率增大，进行动态回复和动态再结晶的时间缩短，动态软化效应减弱。

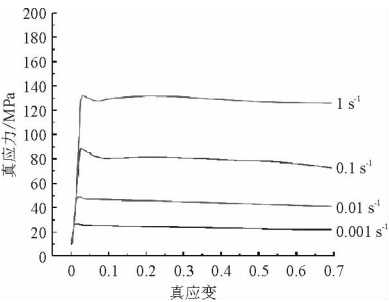


图 2 935 $^\circ\text{C}$ 下 Ti-55531 合金的真应力-真应变曲线

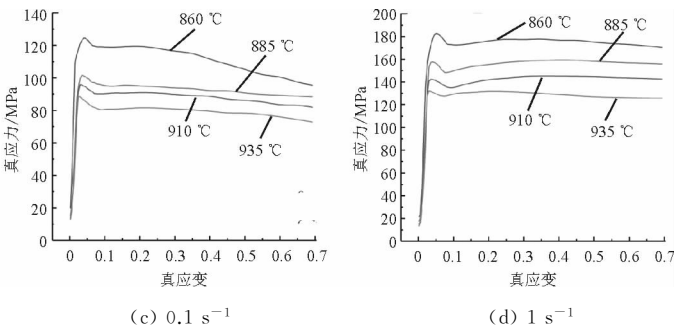
Fig.2 True stress-strain curves of Ti-55531 alloy at 935 $^\circ\text{C}$

试验前在试样中部焊接热电偶丝，试验中在试样两端与压头之间添加石墨片，以减少试样与压头之间的摩擦阻力，使试样变形均匀。所有试样以 3 $^\circ\text{C/s}$ 的加热速率升温至预定温度后保温 3 min，随后开始压缩，结束后立刻进行水淬，保留热变形组织。采用 OLYMPUS PMG3 光学显微镜对热变形后组织进行显微组织分析。

2 试验结果与讨论

2.1 真应力-真应变曲线特征

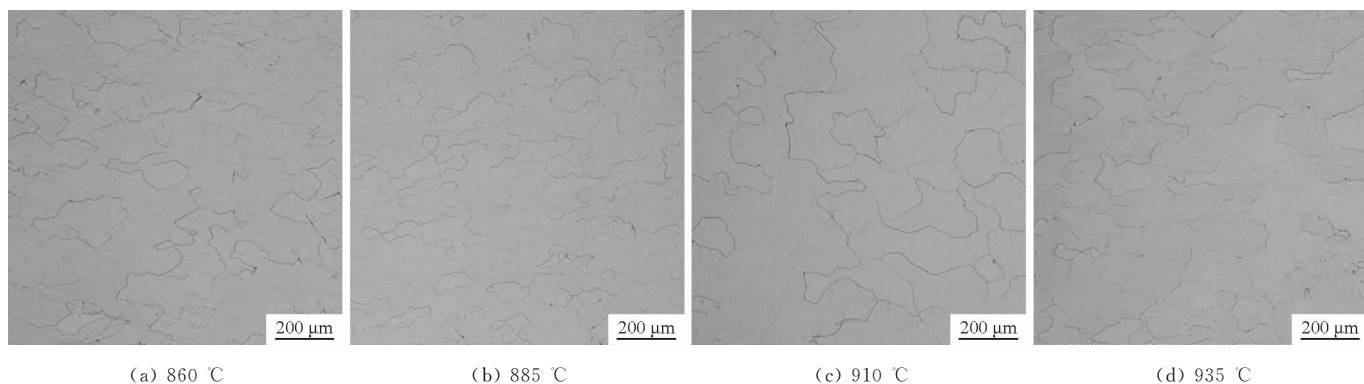
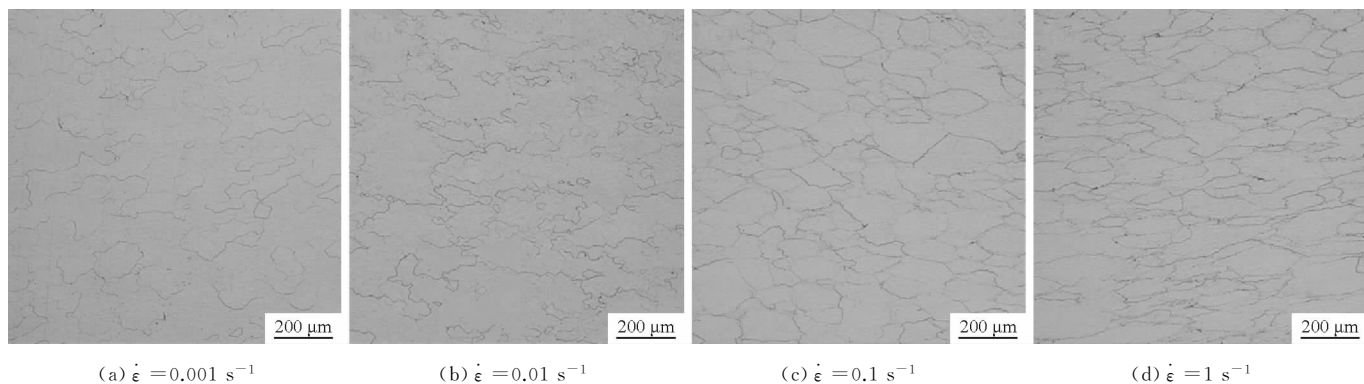
图 1 为 Ti-55531 合金在不同热变形条件下的真应力-真应变曲线。可以看出，在变形初期，合金的流动应力随着应变的增大而迅速增大，此时加工硬化占据主导地位，动态回复引起的软化效应远小于加工硬化。当达到峰值应力后，合金应力下降并逐渐趋于稳定，表明合金的动态回复占据主导地位。此外，在同一应变速率下，随着温度升高，合金的软化作用增强，稳态应力随之下降。



2.2 微观组织的演变

图 3 是 Ti-55531 合金在应变速率为 0.001 s^{-1} 时，不同变形温度下的微观组织。由图 3a 可知，在低应变速率下，晶界凹凸不平，组织中存在细小的再结晶晶粒，说明合金发生了动态再结晶。随着温度升高，再结晶晶粒数量增加，动态再结晶现象更加明显。但是当温度升高至 910 $^\circ\text{C}$ 时，晶粒发生长大和互相吞并，组织变得较为粗大。

图 4 是 Ti-55531 合金在变形温度为 885 $^\circ\text{C}$ 时，不同应变速率下的微观组织。可以看出，当应变速率为 0.001 s^{-1} 和 0.01 s^{-1} 时，晶粒晶界呈锯齿状，在组织中存在细小的再结晶晶粒。当应变速率达到 0.1 s^{-1} 时，晶粒呈扁平状，再结晶晶粒较少，合金的软化效应以动态回复为主。当应变速率为 1 s^{-1} 时，晶粒更加细长，这是因为应变速率较大，变形时间短，合金的动态回复及动态再结晶不充分。

图3 应变速率为 0.001 s^{-1} 时,不同变形温度下 Ti-55531 合金的微观组织Fig.3 Microstructure of Ti-55531 alloy under different deformation temperature when the strain rate is 0.001 s^{-1} 图4 变形温度为 885 °C 时,不同应变速率下 Ti-55531 合金的微观组织Fig.4 Microstructure of Ti-55531 alloy under different deformation rates at 885 °C

2.3 位错密度内变量本构模型

金属的塑性变形行为与位错运动和累积密切相关,塑性变形受到被长程势垒和短程势垒阻碍的位错运动控制,短程势垒可以被热激活运动克服,长程势垒则与温度无关^[7]。根据位错理论^[8],金属材料的流动应力可以表示为:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_{\text{ath}} \quad (1)$$

式中, σ_0 为屈服应力,是反映短程势垒的热应力项; σ_{ath} 为位错亚结构演化引起的应力,是反映长程势垒的非热应力项。

根据泰勒公式,克服长程势垒所需要的非热应力项可以表示为:

$$\sigma_{\text{ath}} = M\alpha\mu b \sqrt{\rho_i} \quad (2)$$

式中, M 为泰勒因子; α 为位错间强度; μ 为剪切模量; b 为伯氏矢量; ρ_i 为当前位错密度。

金属在高温塑性变形中,加工硬化和动态软化是影响位错密度的两种主要机制,位错密度在应变增量 $\Delta\epsilon$ 中的演化为^[9]:

$$\Delta\rho_i = \frac{M}{b} \left(\frac{\sqrt{\rho_i}}{h_w} + \frac{1}{d_0} \right) \Delta\epsilon - h_v \rho_i \Delta\epsilon - s_x \rho_c \frac{\partial X}{\partial \epsilon} \Delta\epsilon - \frac{s_d}{bd^2} \frac{\partial d}{\partial \epsilon} \Delta\epsilon \quad (3)$$

式中,初始位错密度设为 10^{12} m^{-2} ; d_0 为初始晶粒尺寸; d 为平均晶粒尺寸; h_w 为加工硬化系数; h_v 为动态硬化系数; s_x 为动态再结晶系数; s_d 为晶粒尺寸演化系数; ρ_c 为临界位错密度; X 为再结晶分数。

材料的加工硬化、动态回复和动态再结晶行为主要受到温度及应变速率的影响,因此相关系数 h_w 、 h_v 、 s_x 、 s_d 表示为:

$$h_w = A_w \left[\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_w}{RT}\right) \right]^{n_w} \quad (4)$$

$$h_v = A_v \left[\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_v}{RT}\right) \right]^{n_v} \quad (5)$$

$$s_x = A_x \left[\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_x}{RT}\right) \right]^{n_x} \quad (6)$$

$$s_d = A_d \left[\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_d}{RT}\right) \right]^{n_d} \quad (7)$$

式中, A_w 、 A_v 、 A_x 、 A_d 、 Q_w 、 Q_v 、 Q_x 、 Q_d 、 n_w 、 n_v 、 n_x 、 n_d 均为材料常数。

2.4 模型验证

根据 Ti-55531 合金真应力-真应变曲线及加工硬化率曲线 ($\theta = d\sigma/d\epsilon$) 得到各热变形条件下临界应力 σ_c ^[10],通过式(2)可进一步计算得到材料发生动态再结晶的临界位错密度 ρ_c 。基于不同变形条件下的温度及

应变速率,临界位错密度 ρ_c 可以表示为:

$$\rho_c = 6.127\ 6 \times 10^9 \left[\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{320\ 350}{RT}\right) \right]^{0.304\ 9} \tag{8}$$

另外,通过对经热压缩变形的 Ti-55531 合金试样进行微观组织分析,得到不同变形条件下 Ti-55531 合金动态再结晶晶粒尺寸 d_{drx} 和再结晶分数 X 的拟合关系式:

$$d_{\text{drx}} = 572.49 \left[\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{234\ 456}{RT}\right) \right]^{-0.166\ 9} \tag{9}$$

$$X = 1 - \exp\left[-0.693 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_p}\right)^{0.192}\right] \tag{10}$$

式(3)中平均晶粒尺寸 d 可以表示为:

$$d = X d_{\text{drx}} + (1 - X) d_0 \tag{11}$$

采用 Python 语言编写程序实现位错密度内变量迭代计算,并通过遗传算法运算得到建立钛合金本构模

型所需的 12 个材料常数,获得的材料参数优化结果见表 2。

表 2 遗传算法运算获得的本构模型中的材料参数

Tab.2 Material parameters in the constitutive model

obtained by genetic algorithm					
A_w	Q_w	n_w	A_v	Q_v	n_v
6 057.2	266 000	-0.253 4	49.029 6	-2 420 000	-0.007 1
A_x	Q_x	n_x	A_d	Q_d	n_d
0.882	21 735	-1.114 2	0.006 4	-2 280 000	-0.004 5

图 5 为不同变形条件下 Ti-55531 合金流动应力通过位错密度内变量本构模型得到的预测值和试验值的对比图。可以看出,在不同变形条件下 Ti-55531 合金流动应力的预测值与试验值趋势一致,证明建立的模型能够有效地预测 Ti-55531 合金在不同变形条件下的流动应力。

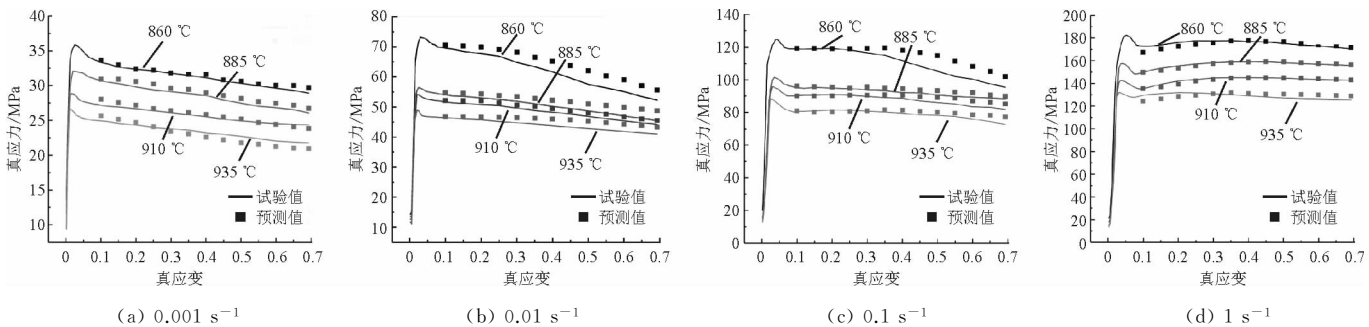


图 5 基于位错密度内变量本构模型的 Ti-55531 合金流动应力预测结果

Fig.5 Prediction results of flow stress of Ti-55531 alloy based on the dislocation density based constitutive model

图 6 分析了位错密度内变量本构模型的流动应力预测值和试验值的相关性,流动应力预测值和试验值之间的相关系数和平均相对误差绝对值分别为 0.982 和 4.54%,说明该模型预测精度较高,可以准确描述 Ti-55531 合金在变形温度为 860~935 °C、应变速率为 0.001~1 s⁻¹ 条件下的流动应力变化情况。

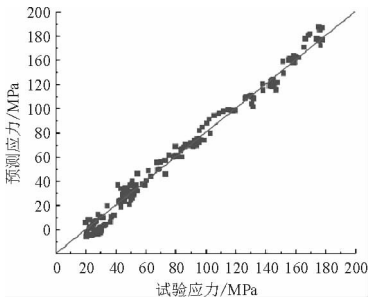


图 6 Ti-55531 应力预测值与试验值相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of predicted value and test value of Ti-55531 alloy stress

3 结 论

(1)Ti-55531 合金在塑性变形过程中同时存在加工硬化和动态软化现象,在塑性变形初期,加工硬化占

据主导地位,流动应力随着应变的增大而迅速增大。当流动应力达到峰值应力后,合金发生了明显的动态软化现象,动态软化效应以动态回复为主,提高应变速率和降低温度都会使稳态应力增大。

(2)Ti-55531 合金的动态再结晶受到温度及应变速率的影响,在高温、低应变速率条件下,动态再结晶现象显著。同时随着温度的升高,晶粒长大并互相吞并,合金组织变得粗大。

(3)建立了 Ti-55531 合金位错密度内变量本构模型,模型流动应力预测值和试验值之间的相关系数和平均绝对相对误差分别为 0.982 和 4.54%,在变形温度为 860~935 °C、应变速率为 0.001~1 s⁻¹ 的条件下,本构模型具有良好的预测能力。

参 考 文 献

[1] 程军,牛金龙,于振涛,等.亚稳定 β 型钛合金的研究进展与应用现状[J].热加工工艺,2015,44(18):14-17.
[2] 杨冬雨,付艳艳,惠松骁,等.高强高韧钛合金研究与应用进展[J].稀有金属,2011,35(4):575-580.
[3] 黄朝文,赵永庆,辛社伟,等.高强韧钛合金热加工变形特征及其影响因素[J].钛工业进展,2016,33(1):8-14.
[4] 王庆娟,李强,孙亚玲.热机械处理对 β 钛合金组织性能的影响[J].金属热处理,2018,43(10):127-132.

挤压铸造 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金的组织与性能

张 亮¹ 王一笑¹ 袁松阳¹ 刘文才¹ 吴国华¹ 涂季冰²

[1.上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心; 2.鼎镁(昆山)新材料科技有限公司]

摘 要 采用流变挤压铸造制备了 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金,通过拉伸试验、SEM 和 TEM 等方法研究了浇注温度对半固态浆料、流变挤压铸造合金组织和力学性能的影响。结果表明,随着浇注温度降低,半固态浆料和流变挤压铸造合金初生 α -Al 相形貌逐渐转变为近球形,在晶界附近析出的第二相分布越来越均匀,平均晶粒尺寸减小,圆整度增加。当浇注温度为 700 ℃时,半固态浆料初生相尺寸最小,约为 35 μm ,平均形状因子约为 0.49,流变挤压铸造后合金平均晶粒尺寸约为 43 μm 。流变挤压铸造合金的力学性能随着浇注温度的降低逐渐提升。合金经过 470 ℃ $\times$ 10 h+500 ℃ $\times$ 2 h 双级固溶后,大部分第二相溶于基体中。120 ℃ $\times$ 24 h 时效处理后,合金的屈服强度为 539 MPa,抗拉强度为 612 MPa,伸长率为 11%。

关键词 流变挤压铸造; Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG249.2;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.05.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Properties of Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc Alloy by Squeeze Casting

Zhang Liang¹, Wang Yixiao¹, Yuan Songyang¹, Liu Wencai¹, Wu Guohua², Tu Jibing²

[1.The National Engineering Research Center of Light Alloy and Net Forming, Shanghai Jiatong University;
2.Dingmei (Kunshan) New Material Technology Co., Ltd.]

Abstract: Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloy was fabricated by rheo-squeeze casting. The effects of pouring temperature on the microstructure and mechanical properties of semi-solid slurry and rheo-squeeze casting alloy were investigated by tensile test, SEM and TEM. The results reveal that with the decrease of pouring temperature, the morphology of the primary α -Al phases in semi-solid slurry and rheo-squeeze casting alloy is gradually converted to the nearly equiaxed ones, and the second phase near the grain boundaries is more evenly distributed, with the average grain size decrease and the roundness increase. When the pouring temperature is 700 ℃, the size of the primary phase in the semi-solid slurry reaches about 35 μm with the average shape factor around 0.49, and the average grain size of the rheo-squeezecasting alloy is about 43 μm . The mechanical properties of rheo-squeeze casting alloy are enhanced with the decrease of pouring temperature. After 470 ℃ $\times$ 10 h+500 ℃ $\times$ 2 h solution treatment, most of the second phase is dissolved in the matrix. After 120 ℃ $\times$ 24 h aging treatment, the yield strength, tensile strength and elongation of Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloy reach 539 MPa, 612 MPa and 11%, respectively.

Key Words: Rheo-squeeze Casting, Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc Alloy, Microstructure, Mechanical Properties

Al-Zn-Mg-Cu 系(7xxx 系)高强铝合金具有比强度高、塑性和耐腐蚀性好、易于机械加工等特点,被广泛应

收稿日期:2020-12-30
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0301003);国家自然科学基金资助项目(51871148,51821001)
第一作者简介:张亮,男,1983 年出生,副研究员,上海(200240),E-mail:liangzhang08@sjtu.edu.cn
引用格式:张亮,王一笑,袁松阳,等. 挤压铸造 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(5):533-538.
ZHANG L, WANG Y X, YUAN S Y, et al. Microstructure and properties of Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloy by squeeze casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5):533-538.

[5] 韩双. Ti55531 钛合金热变形行为研究[D].河北秦皇岛:燕山大学,2018.

[6] 刘少飞,屈银虎,王崇楼,等.金属和合金高温变形过程本构模型的研究进展[J].材料导报,2018,32(13):2 241-2 251,2 277.

[7] LIN Y C, DONG W Y, ZHOU M, et al. A unified constitutive model based on dislocation density for an Al-Zn-Mg-Cu alloy at time-variant hot deformation conditions[J]. Materials Science and Engineering,2018, A718:165-172.

[8] VOYIADJIS G Z, ABED F H. Microstructural based models for bcc and fcc metals with temperature and strain rate dependency[J]. Mechanics of Materials,2005,37(2-3):335-378.

[9] 陈荣创. 300M 钢大型锻件模锻全流程宏微耦合建模与模拟[D].武汉:华中科技大学,2018.

[10] 欧阳德来,鲁世强,崔霞,等. TB6 钛合金 β 区变形的动态再结晶动力学[J]. 材料研究学报,2019, 33(12):918-926.

(编辑:彭瑾)